Interactions géochimiques entre matériaux cimentaires et eaux dans un contexte d'adduction d'eau potable

Maël Desoteux[1,2], Alexandra Bertron[1], Laurie Lacarrière[1], Cédric Roosz[1], Adrien Robin[2], Joel François-Brazier[2]

[1] *Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions)*

[2] *Saint-Gobain PAM Canalisation, Technocentre, Pont-à-Mousson, France*

ABSTRACT Les canalisations d'adduction d'eau en fonte ductile sont protégées par un revêtement cimentaire pouvant induire une augmentation transitoire du pH de l'eau. Ce phénomène dépend de différents paramètres, dont celui de l'équilibre calcocarbonique de l'eau en contact avec le revêtement. Cette étude vise à identifier et comprendre les interactions géochimiques entre une matrice cimentaire de CEM III et des eaux potables de différentes duretés. Il s'agit d'évaluer, en fonction de la composition chimique initiale de l'eau, (i) les amplitudes et les cinétiques d'évolution du pH et de relargage d'ions cimentaires dans l'eau, et (ii) les mécanismes d'altération de la pâte de ciment. Les pâtes de CEM III (contenant des laitiers de hauts-fourneaux) ont été soumises à des essais de lixiviation par de l'eau ultra pure et de l'eau minéralisée. Ces essais ont été réalisés en batchs successifs avec renouvellement régulier de la solution pendant 1 mois. Le pH des solutions de lixiviation est suivi en continu et les concentrations en ions en solution sont analysées à chaque renouvellement. Les modifications minéralogiques, microstructurales et chimiques des matériaux lessivés sont analysées à la fin de l'expérience par DRX et MEB+EDS.

Keywords Matériau cimentaire, Laitier, Eau calcocarbonée, Lixiviation

I. INTRODUCTION

L'eau potable est l'une des ressources les plus contrôlées au monde avec des régulations au niveau européen et au niveau national. Le pH d'une eau potable doit être compris entre 6,5 et 9 (Agence Régional de la Santé, 2012). L'Organisation Mondiale de la Santé note également que des pH élevés impactent négativement certains processus de décontamination, ce qui peut conduire à un traitement insuffisant de l'eau potable, nuisant ainsi aux consommateurs (World Health Organization Regional Office for South-East Asia, 2017). Les compositions d'eaux potables reflètent la grande disparité de la géologie du territoire. Les zones géographiques correspondant à des eaux particulièrement agressives correspondent aux régions dont le sol est constitué de roches magmatiques et métamorphiques (région montagneuse comme les Vosges, le Massif central). À l'inverse, les eaux passant par des massifs de craie ou de calcaire (roches sédimentaires) seront très chargées en ions.

Les canalisations d'adduction d'eaux potables fabriquées par Saint-Gobain PAM Canalisation sont protégées par un revêtement cimentaire CEM III/B. Ce mortier est appliqué par centrifugation, ce qui engendre le développement d'un gradient de propriétés microstructurales particulier, avec des caractéristiques (i) pouvant s'apparenter à celles d'un mortier de CEM III plus riche en sable au contact de la fonte, et (ii) similaire à celles d'une pâte de ciment CEM III directement en contact avec l'eau. (Berthomier, 2020).

L'écoulement de l'eau sur le revêtement peut entraîner la lixiviation des éléments chimiques contenus dans la matrice cimentaire (Ca, Mg, Al, Si, Na, K …) et par conséquent une modification du pH et de la composition de l'eau. Ces modifications dépendent principalement de l'équilibre calcocarbonique de l'eau (Gauthier, 2021). En chimie des eaux, cet équilibre est défini par l'indice de Langelier caractérisant l'agressivité de l'eau envers le carbonate de calcium. Une eau avec un indice de Langelier positif sera susceptible de précipiter du $CaCO_3$ tandis qu'une eau avec un indice de Langelier négatif aura tendance à le dissoudre (Müller-Steinhagen and Branch, 1988).

Les études sur le mécanisme de dissolution/précipitation dans les matériaux cimentaires, généralement basés sur des matériaux CEM I, ont démontré que la cinétique contrôlée par diffusion est une composante importante de la lixiviation (Faucon et al., 1998, 1997 ; Guillon, 2007 ; Han, 2014 ; Keshu, 2013). Les essais liés à ces études sont généralement relativement courts entrainant une dégradation modérée des échantillons. La lixiviation des pâtes de CEM III a surtout été étudiée en environnements agressifs et/ou faiblement minéralisés.

(Berthomier et al., 2021) a étudié la dégradation de pâtes de CEM III par de l'eau pure et de l'eau faiblement minéralisée avec un maintien du pH à 7 par ajout d'acide chlorhydrique. (Bertron et al., 2005) a réalisé une étude sur la lixiviation des pâtes de ciment par des acides organiques. Dans des pâtes à base de CEM III, la dissolution initiale de la portlandite suivie de la dissolution de l'AFm et de l'ettringite ainsi que la décalcification progressive des C-S-H sont comparables à celles observées lors de la lixiviation des pâtes de CEM I (Faucon, 1996 ; Kamali et al., 2008 ; Müllauer et al., 2015). Ces études ont également montré une lixiviation plus importante de l'aluminium par les pâtes de CEM III par rapport aux pâtes de CEM I, mais aucune d'entre elles ne s'est intéressée aux conséquences en termes de mécanismes d'élévation du pH de l'eau lors de la lixiviation des pâtes de CEM III ou à l'effet sur ces matrices, d'eaux fortement minéralisées. Un effort de recherche spécifique est donc nécessaire afin de déterminer les impacts des modifications physico-chimiques des eaux de distribution sur par un revêtement cimentaire ainsi que les effets de ces eaux sur l'intégrité du revêtement.

Ce travail vise donc à étudier les mécanismes les cinétiques d'interactions entre une pâte de CEM III et des eaux pures et fortement minéralisées. Cela passe par la compréhension de deux phénomènes ; d'une part l'influence du revêtement sur l'eau (modification de sa qualité avec modification du pH et relargages éventuels) et d'autre part les effets de l'eau sur le revêtement (modifications chimiques et minéralogiques dues à la lixiviation ou carbonatation aqueuse). Les pâtes de CEM III ont été soumises à des essais de lixiviation par de l'eau ultra pure (EUP) et de l'eau minéralisée (EM). Les quantités d'éléments chimiques en fonction du temps sont déterminées grâce à des analyses ICP-OES. Les matériaux dégradés ont également été étudiés par microscopie électronique à balayage couplée à de la spectroscopie à dispersion d'énergie (SEM-

EDS) et par diffractomètre à rayon X (DRX) pour mettre en évidence leur évolution microstructurale, chimique et minéralogique.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Matériaux

A.1. Matériau cimentaire

Le ciment utilisé pour la confection des revêtements est un ciment au laitier se rapprochant d'un CEM III. Les échantillons de pâte de ciment ont été réalisés avec le même ciment au laitier utilisé par Saint-Gobain PAM Canalisation pour la fabrication de ses revêtements cimentaires. Un ratio eau/ciment de 0,31 a été utilisé, correspondant au rapport E/C moyen de plusieurs couches de surface de revêtements de tuyaux à la sortie d'usine.

Les pâtes cimentaires ont été obtenues avec un malaxeur normalisé et en suivant le protocole de mixage : homogénéisation manuelle du mélange eau et ciment, mélange au malaxeur normalisé pendant 30 s suivant la norme 196-3, mélange manuel en raclant les bords puis mélange au malaxeur normalisé pendant 30 s. Les moules en 4x4x16 cm sont ensuite remplis à moitié puis vibrés à la table de vibration avant d'être complétés et vibrés une dernière fois. Les pâtes moulées sont stockées à 20 °C et protégées par une feuille de plastique sur le dessus des moules. Les pâtes sont démoulées après 24 h et conservées à 20 °C dans des sacs en plastique scellés pendant 27 jours. Les prismes ainsi obtenus sont ensuite résinés et sciés en tranche de 1 cm. Les échantillons offrent ainsi deux surfaces en vis-à-vis pouvant être lixiviées (surface exposée 2x16 cm²).

A.2. Solutions de lixiviation

Le choix des eaux se base sur leurs indices de Langelier, cet indice nous a servi à évaluer deux pôles de compositions rencontrés en France (des eaux plutôt agressives d'un côté et plutôt entartrante de l'autre). Les eaux choisies reflètent ces deux pôles, le système a ensuite été simplifié en choisissant une eau ultra pure en tant qu'eau agressive et une eau fortement minéralisée de la marque Vittel en tant qu'eau entartrante. La composition de cette eau minéralisée a été mesurée par ICP-OES et est détaillée dans le TABLEAU 1.

TABLEAU 1. Composition de l'eau en bouteille Vittel (mg/L)

	Ca	Na	K	Mg	Si	SO_3	NO_3^-	HCO_3	Al	Indice de Langelier	pH
Concentration (mg/L)	211,75	5,06	2,47	44,86	6,39	392	4,6	361,36	0,057	0,94	7,4
Ecart type	2,89	0,02	0,09	2,93	0,37	16,70	0,04	10,45	0,037	-	-

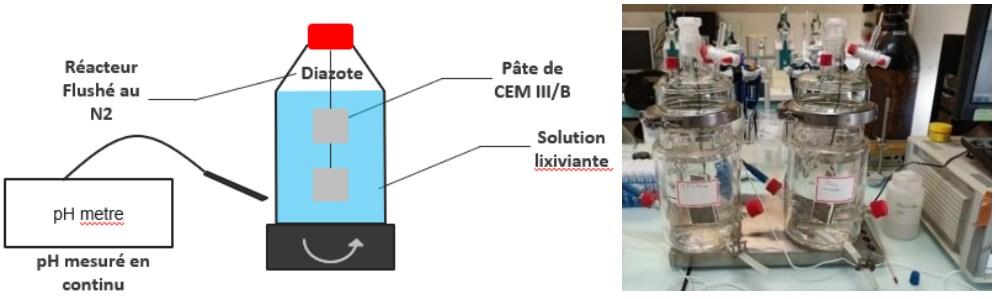
B. Méthodes

B.1. Essais de lixiviation

Des essais de lixiviation par batch successif ont été réalisés sur les pâtes monolithiques de CEM III. Ces essais sont caractérisés par un suivi du pH pendant toute la durée de l'essai (via une sonde pH), celui-ci n'étant pas maintenu, les solutions d'exposition sont renouvelées lorsque le pH de l'eau ultra-pure est stabilisé. Le dispositif expérimental est composé de deux réacteurs, contenant chacun deux litres de solution d'exposition et deux échantillons pâtes de CEM III

monolithiques (soit un rapport volume de liquide sur surface de solide de 30 cm). La solution d'exposition est continuellement agitée grâce à un agitateur magnétique. La FIGURE 1 montre le montage des essais de lixiviation.

Les tests de lixiviation ont duré 1 mois à une température de 20 °C. Lors des premières heures du test, des prélèvements de la solution d'exposition sont réalisés à intervalles réguliers



(1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h). Les prélèvements sont ensuite réalisés à chaque renouvellement.

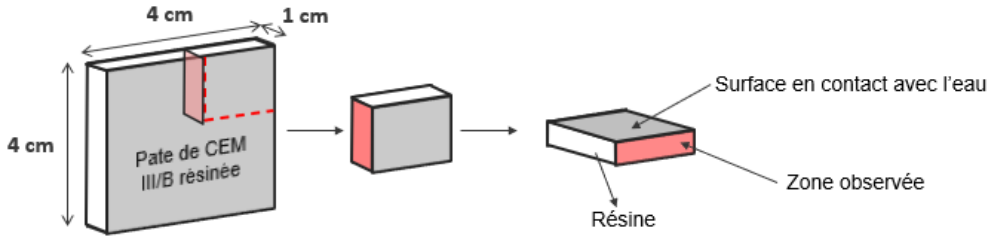
FIGURE 1. Représentation schématique du test de lixiviation réalisé sur échantillons monolithiques

B.2. Analyses des lixiviats

Les compositions chimiques des lixiviats sont déterminées par ICP-OES (spectroscopie d'émission de plasma à couplage inductif). Les concentrations des éléments Ca, Si, Mg, Al, K, Na sont analysées. L'analyse des éléments majeurs est faite après acidification et dilution des prélèvements afin de rester dans les gammes de détection. L'ICP est calibré avec des solutions standards, une première passe avec calibrage multiéléments permet l'analyse de Ca, Mg, Na, K, Al. Une seconde passe permet la détermination de la concentration en Si après calibrage.

B.3. Analyses des matériaux cimentaires

L'examen microstructural des matériaux lixiviés est réalisé à l'aide d'un MEB (Jeol JSM-6380 LV) et d'un EDS (Bruker XFlash® 6/30) pour l'analyse chimique. La zone analysée est présentée en FIGURE 2 . Les pâtes de ciment monolithiques sont sciées et les matériaux lixiviés sont insérés dans une résine (Presi Mecaprex Ma2+), polis (avec disques de carbure de silicium avec des tailles de grains de 26 µm [800], 15 µm [1200] et 10 µm [2000] puis revêtu de pâte diamantée de 9 µm, 6 µm et 1 µm) et enfin métallisés. La composition chimique du solide est analysée par pointés EDS, réalisés dans des zones identifiées caractéristiques de la pâte hydratée et des phases anhydres (dans les zones dégradées et les zones saines). Les caractéristiques minéralogiques du matériau lixivié sont déterminées par DRX. Le matériau est abrasé au fur et à mesure des analyses afin de déterminer l'évolution de la minéralogie de la pâte de ciment lixiviée en fonction de la



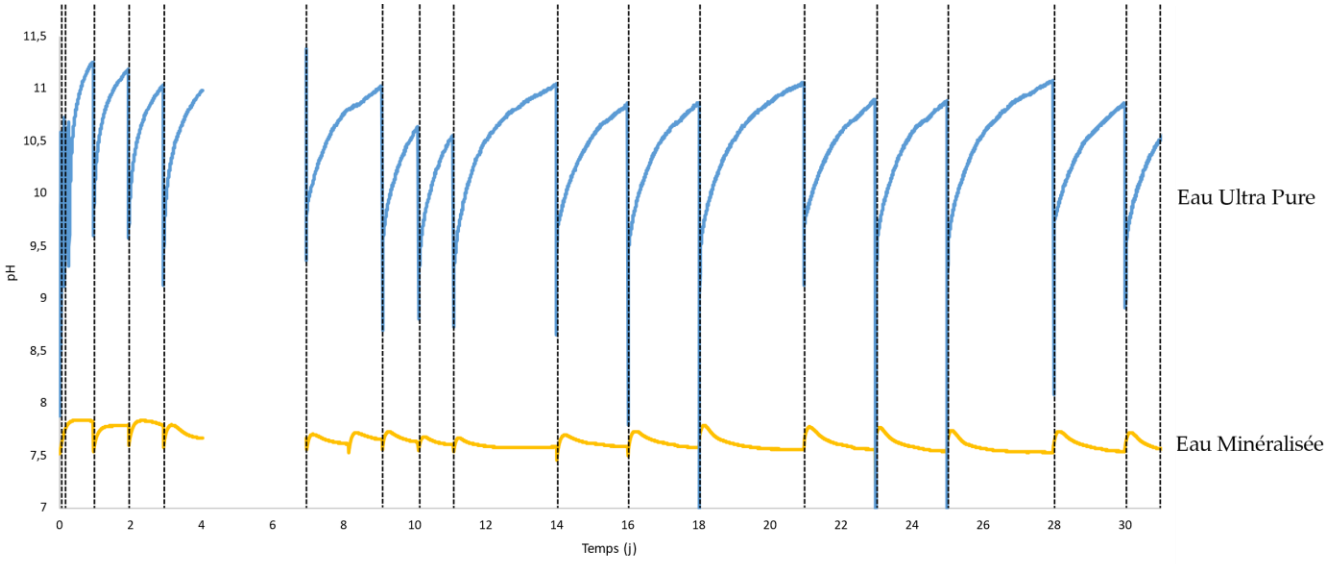
profondeur.

FIGURE 2. Préparation des échantillons lixiviés pour analyse au MEB/EDS

III. RÉSULTATS

A. Analyse des évolutions du pH

La FIGURE 3 montre les évolutions du pH lors de l'essai de lixiviation. Celles-ci sont très différentes en fonction de la minéralisation de l'eau. L'eau ultra pure présente des remontées de pH très rapide (le pH de renouvellement est atteint en 24h sur les premiers jours de l'essai). Le pH de l'eau minéralisée au contact de la pâte cimentaire reste stable et systématiquement compris



entre 7,5 et 8.

FIGURE 3. Évolution du pH de la solution lixiviante (eau ultra pure et eau minéralisée), chaque ligne verticale correspond à un renouvellement de la solution

B. Analyses des lixiviats

La FIGURE 4 montre les résultats de relargage obtenus pour l'essai de lixiviation à l'eau ultra pure (mesures faites à chaque renouvellement). Les concentrations en ions dans la solution sont présentées en quantités cumulées et tracées en fonction de la racine carrée du temps. Dans le cas de l'eau minéralisée, les concentrations présentées sont des concentrations cumulées corrigées en retranchant les éléments déjà présents dans l'eau minéralisée. Une valeur positive indique un possible relargage par la matrice et une valeur négative une captation.

Pour l'eau ultra pure, les courbes montrent des phénomènes cinétiques contrôlés par le transport diffusif. En effet les relargages des ions Ca, Si, Al et Mg évoluent linéairement en fonction de la racine carrée du temps. Une rupture de pente est observée à partir du 4^{e} jour pour les éléments K et Na.

Les essais à l'eau minéralisés montrent des comportements de relargages/captation différents de ceux à l'eau ultra-pure. La FIGURE 4 montre un relargage important de Ca au début de l'expérience avec une agressivité plus importante vis-à-vis du calcium sur les premiers jours en comparaison avec l'essai à l'eau ultra-pure. Le relargage d'aluminium est moins important que pour l'essai à l'eau ultra pure et présente une rupture de pente à partir du 4^{e} jour. Des phénomènes de captation sont également observés (concentrations cumulées corrigées

décroissantes), notamment pour les éléments Mg et Si avec une accélération de la fixation par la matrice cimentaire du magnésium à partir du 4e jour.

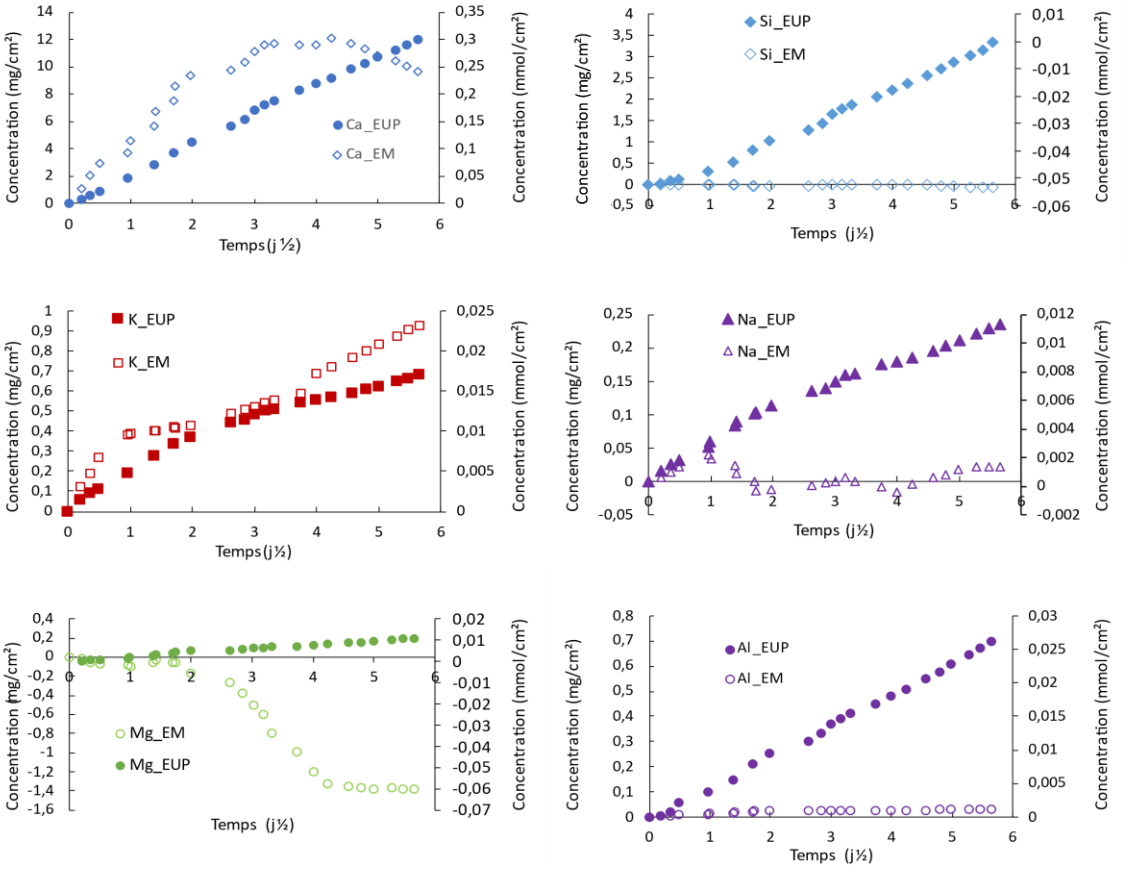


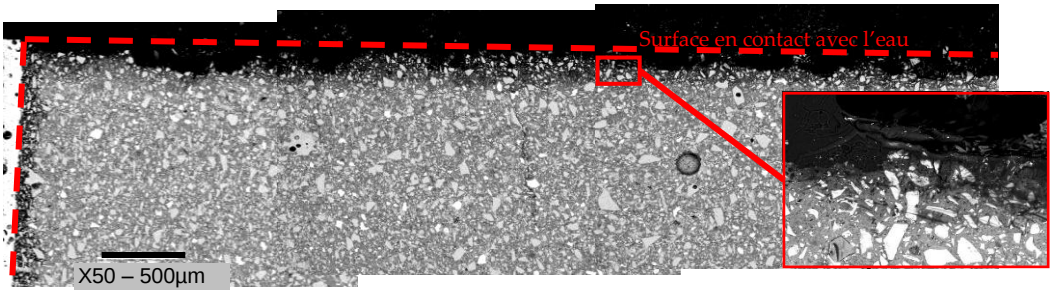
FIGURE 4. Concentrations cumulées corrigées des éléments lessivés (valeur positives) ou captés (valeurs négatives) lors de l'essai de lixiviation à l'eau minéralisée Vittel (EM) et à l'eau ultra pure (EUP) d'une pâte de ciment monolithique. Les éléments déjà présents dans l'eau ont été retranchés et les concentrations sont cumulées pour avoir la totalité des éléments entrant ou sortant de la matrice

C. Analyses des matériaux cimentaires

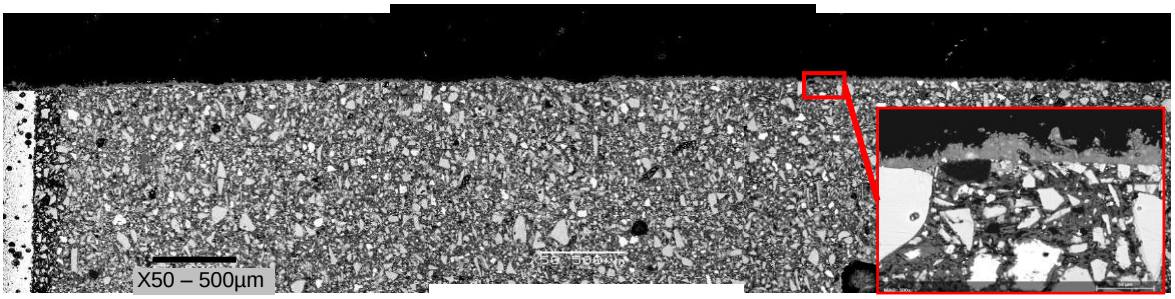
La FIGURE 5 montre des profils MEB, en mode électrons rétrodiffusés, des matériaux après 1 mois d'exposition aux eaux testées. Les images montrent une pâte de ciment hétérogène contenant la pâte hydratée de densité plus faible et des grains anhydres résiduels.

Pour les essais à l'eau pure, les pointés EDS révèlent une décalcification de la pâte de ciment dégradée par rapport à la pâte de ciment saine. La teneur chimique moyenne en CaO de la pâte hydratée sur les 50 premiers microns passe de 54,2 % à 36,9 % après exposition à l'eau pure. La quantité d'éléments chimiques analysés étant normalisée à 100 %, il en résulte une augmentation relative des pourcentages de SiO_2, Al_2O_3 et MgO.

Pour les essais à l'eau minéralisée, on constate que le matériau présente un dépôt de surface. L'analyse par pointés EDS montre que ce dépôt est composé majoritairement de calcium (95 % CaO). La composition chimique de la pâte hydratée sous le dépôt calcique est proche de celle d'une pâte de ciment saine.



a) Pâte de CEM III lixivié à l'eau ultra-pure



b) Pâte de CEM III lixivié à l'eau minéralisée

FIGURE 5. Image MEB en mode électron rétrodiffusé des pâtes de ciment lixiviées a) à l'eau ultra-pure et b) à l'eau minéralisée

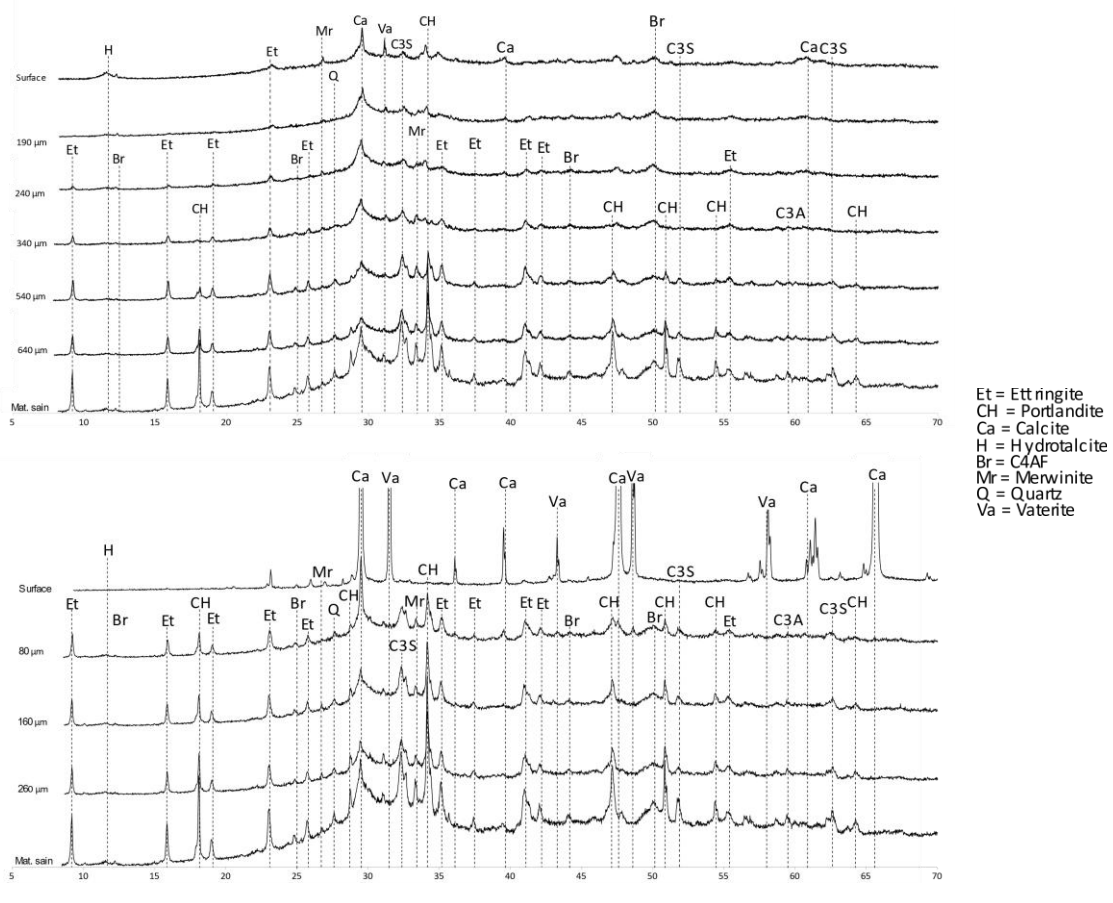


FIGURE 6. Analyse minéralogique des pâtes de ciments monolithiques lixiviées par eau ultra-pure (a) et par eau minéralisée (b)

L'analyse minéralogique par DRX des pâtes de CEM III lixivié à l'eau ultra-pure montre la dissolution de la portlandite, ettringite, C_2S et C_3S initialement présentes dans le matériau sain. La merwinite et l'hydrotalcite sont également détectés à la surface de l'échantillon, ainsi qu'un pic de faible intensité correspondant à la brownmillérite (C_4AF). La surface de l'échantillon lixivié à l'eau minéralisée montre un dépôt de calcite et de vatérite très cristallisé, sous le dépôt on observe une légère amorphisation du matériau avec des intensités de pics augmentant au fur et à mesure notamment pour l'ettringite, la portlandite, la merwinite et C2S/C3S.

IV. Discussion

Les analyses des solutions de lixiviation montrent des phénomènes de relargage/captation très différents entre les essais. Les essais de lixiviation à l'eau ultra-pure révèlent des phénomènes de diffusion avec des concentrations cumulées linéaires en fonction de la racine carrée du temps tandis que la lixiviation à l'eau minéralisée montre des ruptures de pente pour plusieurs éléments à partir du 4e jour.

Nos essais à l'eau minéralisée présentent également des phénomènes de captation par la matrice cimentaire pour le magnésium ainsi que des ruptures de pente au 4e jour de l'essai pour les éléments Mg, Al, Ca, K. Les quantités lixiviées sont globalement plus faibles que lors de l'essai à l'eau ultra-pure.

L'échantillon lixivié à l'eau minéralisée révèle un dépôt calcique correspondant à un mélange de calcite et de vatérite. La composition moyenne de la pâte hydratée sous le dépôt correspond à celle d'une pâte saine. Il est possible que ce précipité calcique ait joué un rôle protecteur, il serait intéressant de corréler les ruptures de pentes aux changements minéralogiques de la pâte cimentaire lors de l'essai de lixiviation à l'eau minéralisée.

Si le dépôt de calcite apparait au 4e jour, il pourrait jouer un rôle sur les cinétiques de relargages et de captation par la matrice cimentaire. Le revêtement cimentaire est donc susceptible de changer la composition chimique de l'eau via des relargages d'éléments (Ca, Mg, Si, Al) et d'affecter sa composition en augmentant son pH de manière significative. La composition de l'eau a également un effet sur le revêtement cimentaire, les changements sur sa composition minéralogique sont fortement corrélés à la composition de l'eau. Une eau déminéralisée a tendance à dégrader le matériau tandis qu'une eau fortement minéralisée peut faire apparaitre un dépôt calcique possiblement protecteur. Il serait intéressant d'effectuer des essais de lixiviation sur ces pâtes cimentaires en faisant varier la composition de l'eau dans le but de déterminer le domaine de composition pour lequel les remontées de pH et les relargages sont limités.

Berthomier et al., 2021 a effectué des essais de lixiviation sur pâte monolithique de CEM III (rapport E/C de 0,31) avec maintien du pH à 7 par ajout d'acide. Les échantillons sont lixiviés avec de l'eau déminéralisée et de l'eau faiblement minéralisée avec un indice de Langelier de -1,5.

On observe des relargages d'éléments plus importants dans nos essais de lixiviation à l'eau ultra-pure comparativement aux essais effectués par Berthomier pour les éléments Ca (1,5 fois plus important), Mg (2 fois plus important), Si (10 fois plus important), Al (30 fois plus important).

Ces différences s'expliquent par l'effet du pH entrainant des solubilités plus importantes de ces éléments dans nos gammes (Alexander et al., 1954; Pernitsky and Edzwald, 2003). En effet, les remontées de pH lors des essais à l'eau ultra-pure sont significatives avec des valeurs de pH atteintes de 11 à chaque renouvellement de solution.

Ces résultats montrent une plus forte agressivité lors de notre essai à l'eau ultra-pure dans nos conditions d'essais (pH flottant) avec un pH en moyenne plus élevé et des relargages plus importants. Le protocole de l'essai, et par extension les conditions hydrodynamiques dans la canalisation jouent donc un rôle important sur les phénomènes de dégradation de la matrice cimentaire et de relargages d'éléments pouvant conduire à une altération de la qualité de l'eau.

V. Conclusion

Cette étude avait pour but de déterminer les interactions entre un revêtement cimentaire de CEM III et des eaux potables potentiellement fortement minéralisées. On cherchait à étudier l'impact du revêtement sur la qualité de l'eau ainsi que les effets de cette eau sur le revêtement. Des pâtes de ciments ont donc été soumises à des essais de lixiviation avec une eau agressive et une eau fortement minéralisée. Les résultats des essais de lixiviation à l'eau ultrapure montrent une dégradation du matériau cimentaire ainsi qu'une amorphisation des phases cimentaires présentent à la surface de l'échantillon lixivié. En effet, les pics observés lors de l'analyse minéralogique par DRX sont moins importants pour le matériau lixivié, indiquant des phases moins cristallisées. Les relargages de la matrice cimentaire amènent des modifications de pH significatives. Les essais de lixiviation à l'eau minéralisée montrent l'apparition d'une couche de calcite potentiellement protectrice ainsi qu'une absence d'impact sur le pH. Les relargages d'éléments sont plus limités et des phénomènes de captation par la matrice cimentaire ont été mis en évidence. Les eaux pas ou faiblement minéralisée auront tendance à augmenter le pH de l'eau de manière significative, influant sur sa qualité mais aussi sur les éventuels traitements effectués en aval. Des études plus approfondies avec un panel d'eau minéralisée plus complet peuvent mettre en évidence un point de bascule sur les indicateurs utilisés (concentration en calcium, indice de Langelier) pour lequel les remontées de pH sont limitées, réduisant fortement l'impact du revêtement cimentaire sur la qualité des eaux potables. Des variations du protocole d'essai seraient également intéressantes pour rendre compte des conditions hydrodynamiques variées des eaux potables dans les canalisations (stagnation, écoulements faibles, renouvellement important, canalisation sous pression…).

VI. References

Agence Régional de la Santé, 2012. Qualité de l'eau du robinet en France.

Alexander, G.B., Heston, W.M., Iler, R.K., 1954. The Solubility of Amorphous Silica in Water. J. Phys. Chem. 58, 453–455. https://doi.org/10.1021/j150516a002

Berthomier, M., 2020. Etude de la lixiviation de l'aluminium de matériaux cimentaires à base de CEM III utilisés dans les canalisations d'eau potable: approche expérimentale et numérique. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

Berthomier, M., Lors, C., Damidot, D., De Larrard, T., Guérandel, C., Bertron, A., 2021. Leaching of CEM III paste by demineralised or mineralised water at pH 7 in relation with

aluminium release in drinking water network. Cem. Concr. Res. 143, 106399. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106399

Faucon, P., 1996. LEACHING OF CEMENT: STUDY OF THE SURFACE LAYER. Cem. Concr. Res. 26 26. https://doi.org/DOI: 10.1016/S0008-8846(96)00157-3

Faucon, P., Adenot, F., Jacquinot, J.F., Petit, J.C., Cabrillac, R., Jorda, M., 1998. Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physico-chemical mechanisms of water degradation. Cem. Concr. Res. 28, 847–857. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00053-2

Faucon, P., Adenot, F., Jorda, M., Cabrillac, R., 1997. Behaviour of crystallised phases of Portland cement upon water attack. Mater. Struct. 30, 480–485. https://doi.org/10.1007/BF02524776

Gauthier, A., 2021. Approche expérimentale et modélisation de la lixiviation des ouvrages de traitement d'eau potable en béton exposés à des eaux agressives. UMR CNRS 6183, Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM).

Guillon, E., 2007. Durabilité des matériaux cimentaires: modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles. École Normale Supérieure de Cachan.

Han, F., 2014. Effect of fresh water leaching on the microstructure of hardened composite binder pastes | Elsevier Enhanced Reader. Constr. Build. Mater. 68, 630–639. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.019

Kamali, S., Moranville, M., Leclercq, S., 2008. Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: Experiments and modelling. Cem. Concr. Res. 38, 575–585. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.009

Keshu, W., 2013. Experimental and modelling research of the accelerated calcium leaching of cement paste in ammonium nitrate solution. Constr. Build. Mater. 40, 832–836. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.066

Müllauer, W., Beddoe, R.E., Heinz, D., 2015. Leaching behaviour of major and trace elements from concrete: Effect of fly ash and GGBS. Cem. Concr. Compos. 58, 129–139. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.002

Müller-Steinhagen, H.M., Branch, C.A., 1988. Comparison of indices for the scaling and corrosion tendency of water. Can. J. Chem. Eng. 66, 1005–1007. https://doi.org/10.1002/cjce.5450660617

Pernitsky, D.J., Edzwald, J.K., 2003. Solubility of polyaluminium coagulants. J. Water Supply Res. Technol.-Aqua 52, 395–406. https://doi.org/10.2166/aqua.2003.0036

World Health Organization. Regional Office for South-East Asia, 2017. WHO South-East Asia Journal of Public Health, Volume 6, Issue 2, September 2017. World Health Organization. Regional Office for South-East Asia, New Delhi.